снабжение и санитарная техника. – 2005. – №7. – С.30-35.

6.Найманов А.Я. Особенности оценки надежности кольцевой водопроводной сети // Водоснабжение и санитарная техника. – 2006. – №12. – С.11-16.

7.Храменков С.В., Примин О.Г. Оценка надежности трубопроводов системы водоснабжения Москвы // Водоснабжение и санитарная техника. – 1998. – №7. – С.2-5.

8.П'єхурскі Ф. Причини й оцінка аварійності розподільної водопровідної мережі // Ринок інсталяцій. – 2003. – №6 (78). – С.11-13.

9.Новохатній В.Г. Надійність подавально-розподільного комплексу систем водопостачання // Науковий вісник будівництва: Зб. наук. праць. Вип.47.– Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2008. – С.265-269.

10.Новохатній В.Г., Матяш О.В. Надійність водопровідних труб за даними експлуатації // Науковий вісник будівництва: Зб. наук. праць. Вип.51. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2009. – С.136-140.

Отримано 28.08.2009

УДК 658.24

Н.В.ГРИНЧАК, канд. техн. наук, Е.В.КУЗЬМИЧЕВА, Д.А.ВОЛКОВ
Харьковская национальная академия городского хозяйства

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИНЖЕНЕРНОЙ СЕТИ ДЛЯ ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ НА ПЕРСОНАЛЬНОМ КОМПЬЮТЕРЕ

Рассматривается способ представления трубопроводных систем (на примере газовой сети) в математическом виде, удобном для реализации на компьютере. Показано, что при расчетах трубопроводных систем можно использовать огромное количество методов и алгоритмов, разработанных для систем электроэнергетики.

Розглядається спосіб подання трубопровідних систем (на прикладі газової мережі) у математичному вигляді, зручному для реалізації на комп'ютері. Доведено, що при розрахунках трубопровідних систем можна використати величезну кількість методів і алгоритмів, створених для систем електроенергетики.

The method of pipeline systems presentation (by the example of a gaze network) is considered in a mathematical form, which is more suitable for computer realization. It was showed, that it is possible to use a large quantity of methods and algorithms, which are produced for the electroenergetic systems, for the pipeline systems calculations.

Ключевые слова: граф, узел, трубопроводные системы, математическая модель.

Процесс проектирования трубопроводных (в данном случае – газовых) сетей в конечном итоге сводится к решению систем уравнений (линейных и нелинейных). От эффективности способов формирования и хранения этих систем уравнений во многом зависит эффективность реализуемых расчетных задач на сетях.

Сеть состоит из узлов. Узел – это источник газа или потребитель. Неважно откуда поступает газ: из резервуара, от компрессорного агрегата, из сети более высокого давления через регуляторный пункт. Важно, что через какие-то точки (узлы) газ поступает в сеть (будем называть эти точки *источниками*), а через какие-то точки (узлы) газ отбирается из сети. Точки отбора будем называть *потребителями*. Узлы характеризуются двумя величинами: расходом Q_i и давлением P_i (i – номер узла). Узлы, которые не являются ни источниками, ни потребителями – просто точки соединения трубопроводов, нас не интересуют. Узлы соединены между собой участками трубопроводов. Участок имеет какую-то длину l и диаметр d. Через него в единицу времени протекает какое-то количество газа q. В процессе транспортировки газа на участке происходит потеря (падение) давления. Перепад давлений на участке – это разность между давлением в узле, из которого участок выходит и давлением в узле, в который участок входит $h=P_i$-P_j. С изменением расхода газа на участке q меняется и потеря давления h (записывается $h=f(q)$ или $h(q)$). Расход q и потеря давления h на участке могут быть положительными – газ протекает от узла, который является началом участка, к узлу, который является концом участка; q и h могут быть и отрицательными – направление движения газа противоположно направлению участка.

Простейшая газовая сеть – участок трубопровода (рис.1).

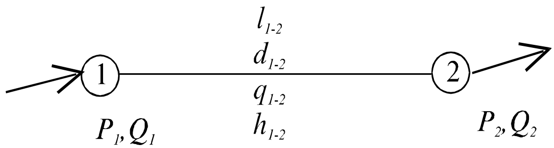

Рис.1

Стрелка, направленная к сети, обозначает, что узел 1 – источник, стрелка, направленная от сети, обозначает, что узел 2 – потребитель. Узлы можно нумеровать произвольно, например 2, 7, 1005 и т.д. В этой сети газ однозначно протекает от узла 1 к узлу 2.

Возьмем сеть немного сложнее (рис.2).

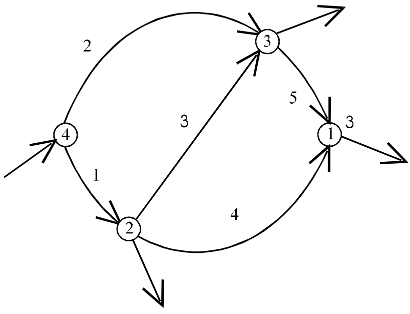

Рис.2

Узел 4 – источник. Узлы 1, 2, 3 – потребители. Узлы пронумерованы произвольно. Для удобства участки тоже пронумерованы. Хотя участки однозначно определяются узлами, которые он соединяет.

На рис.2 направление участков обозначено стрелками. Для участка 2 направление стрелки указывает, что это участок 4-3, а не 3-4. Причем, без предварительных расчетов трудно определить, протекает газ от узла 1 к узлу 2 или наоборот. Это тот случай, когда расход q и потеря давления h могут быть и положительными, и отрицательными.

Мысленно представим себе, что существует резервуар с газом, давление в котором P=0. Представим себе, что газ поступает в сеть из этого резервуара и уходит из сети в этот же резервуар. На схеме, изображающей газовую сеть, резервуар изобразим узлом и присвоим ему номер 0 (ноль), соединим все входы и выходы сети с этим узлом (рис.3).

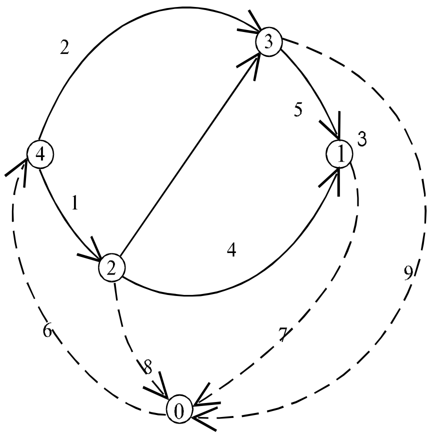

Рис.3

Реально существующие участки трубопроводов будем называть в дальнейшем *реальными*, а те, которыми мы мысленно соединили узел 0 с сетью – *фиктивными*. Узел 0 – тоже *фиктивный* узел.

С точки зрения физических процессов, происходящих в распределительной сети, ничего не изменилось, но сеть из открытой превратилась в замкнутую.

В связи с изменившейся схемой сети уточним некоторые обозначения:

$$q_6 = q_{0\text{-}4} = Q_4\,; \tag{1}$$

$$q_7 = q_{1-0} = Q_1 ; \tag{2}$$
$$q_8 = q_{1-2} = Q_2 ; \tag{3}$$
$$q_9 = q_{3-0} = Q_3 ; \tag{4}$$
$$h_6 = h_{0-4} = P_0 - P_4 = -P_4 ; \tag{5}$$
$$h_7 = h_{1-0} = P_1 - P_0 = P_1 ; \tag{6}$$
$$h_8 = h_{2-0} = P_2 - P_0 = P_2 ; \tag{7}$$
$$h_9 = h_{3-0} = P_3 - P_0 = P_3 . \tag{8}$$

Узловые расходы мы заменили расходами на фиктивных участках, а давления в узлах – перепадами давлений на фиктивных участках. В дальнейшем про узлы, номера узлов, параметры узлов мы забываем, будем иметь дело только с участками и номерами участков. Это дает, во-первых, единообразие (мы преобразовали характеристики узлов в характеристики фиктивных участков). При этом мы не увеличили число переменных и не усложнили задачу, а просто заменили одни переменные другими, т.е. упростили систему обозначения переменных, уменьшили количество типов переменных (были расходы узлов и участков, остались только расходы на участках, хотя их стало больше). Упростилось понимание задачи, ниже мы покажем, что упростился также алгоритм решения задачи.

Во-вторых, для такой замкнутой сети справедливы законы, аналогичные законам электрических сетей [1], а именно:

Первый закон Кирхгофа: Алгебраическая сумма токов в любом узле равняется нулю. Или сумма токов, втекающих в узел равна сумме токов, вытекающих из узла. Это достаточно очевидно (рис.4):

$$q_2 - q_3 + q_5 - q_7 = 0.$$

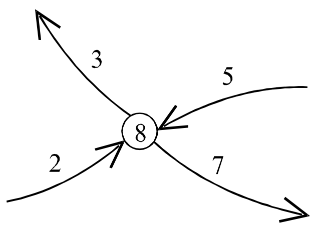

Рис.4

Второй закон Кирхгофа: Сумма падений напряжений по любому замкнутому контуру сети равняется нулю.

Напряжение на источнике питания равно сумме падений напряжений на реостате и на лампочке, или $-U_1+U_2+U_3=0$. В сложной многоконтурной сети, для любого контура справедливо то же самое.

Закон, аналогичный закону Ома, который гласит: ток, протекающий через линейный участок электрической цепи пропорционален приложенному напряжению и обратно пропорционален сопротивлению участка.

$$I = \frac{U}{R} \tag{9}$$

или

$$U = I \cdot R. \tag{10}$$

Для газовой сети это означает, что при протекании газа через участок трубопровода, на нем происходит потеря давления $h = P_н - P_к$, которая зависит от количества газа, протекающего через участок q, длины l и диаметра d трубопровода и некоторых других факторов. Конкретные формулы можно позаимствовать из соответствующих нормативных документов. Например для газовой сети низкого давления в критическом режиме (число Рейнольдса Re = 2000÷4000) [3].

$$h = \frac{q_i^{2.333}}{d_i^{5.333} \nu^{0.333}} \rho \cdot l_i. \tag{11}$$

В общем виде, для участка с номером i будем записывать этот закон так:

$$h_i = f(q_i). \tag{12}$$

Эти уравнения называются уравнениями связи, поскольку они устанавливают взаимосвязь между потерей напора h и расходом q на конкретном участке. Естественно, можно предположить, что существует и другая форма записи уравнений связи

$$q_i = \varphi(h_i). \tag{13}$$

Разобравшись с законами построим математическую модель газовой сети. Для примера построим математическую модель газовой сети, изображенную на рис.3.

Математическая модель газовой сети – это система уравнений, состоящая из какого-то количества уравнений, соответствующих первому закону Кирхгофа, какого-то количества уравнений, соответствующих второму закону Кирхгофа и какого-то количества уравнений связи.

Определим, сколько всего уравнений будет содержать математическая модель нашей сети. Для этого сначала определимся с количеством переменных.

Обозначим общее количество узлов в сети – v; общее количество участков (реальных и фиктивных) – e, $e=l+m+n$, где m – количество реальных участков; l – количество фиктивных участков, соответствующих источникам; n – количество фиктивных участков, соответствующих потребителям.

Каждый реальный участок характеризуется тремя независимыми переменными: расходом q_i, потерей напора h_i и гидравлическим сопротивлением $c_i = f(l_i,d_i)$ – всего $3m$ переменных. Каждый из фиктивных участков характеризуется только двумя переменными: q_i и h_i. Для фиктивных участков понятие гидравлического сопротивления не определено, т.е. какой-либо функциональной зависимости между q_i и h_i для этих участков нет.

Таким образом, общее количество переменных: $3m + 2(l+n)$ или $2e+m$. По условию задачи на каждом из участков задана одна из переменных: для реальных участков – это $c_i = f(l_i,d_i)$, для фиктивных участков – это q_i или h_i. Из общего количества $2e+m$ переменных e переменных заданы, неизвестными остаются $e+m$ переменных. Для того, чтобы задача была разрешимой, количество уравнений математической модели должно соответствовать количеству неизвестных переменных.

Математическая модель газовой сети должна содержать $e+m$ переменных

$$e+m = 9+5=14 \text{ (уравнений).}$$

Для начала запишем уравнения связи. Сколько участков (реальных), столько уравнений

$$h_1 = f(q_1)\ ; \tag{14}$$
$$h_2 = f(q_2)\ ; \tag{15}$$
$$h_3 = f(q_3)\ ; \tag{16}$$
$$h_4 = f(q_4)\ ; \tag{17}$$
$$h_5 = f(q_5). \tag{18}$$

Запишем уравнения, соответствующие первому закону Кирхгофа. Если в сети v узлов, то можно записать v - 1 уравнение. Возьмем сеть, состоящую из двух узлов (рис.5).

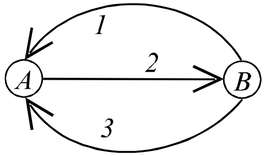

Рис.5

Для узла A $q_1 - q_2 + q_3 = 0$; для узла B $-q_1 + q_2 - q_3 = 0$; т.е. уравнение для узла B никакой новой информации не несет [3]. Но и в более сложных сетях последний узел (неважно, с каким он номером окажется) никакой дополнительной информации не несет. Правильно будет сказать: уравнение, выражающее первый закон Кирхгофа для последнего узла является линейной комбинацией уравнений для предыдущих v - 1 узлов.

Для узла 0

$$q_6 + q_7 + q_8 + q_9 = 0\,; \tag{19}$$

Для узла 1

$$q_4 + q_5 - q_7 = 0\,; \tag{20}$$

Для узла 2

$$q_1 - q_3 - q_4 - q_8 = 0\,; \tag{21}$$

Для узла 3

$$q_2 + q_3 - q_5 - q_9 = 0. \tag{22}$$

Мы записали m+v-1 уравнение. Осталось записать (e+m)-m-(v-1) = e-v+1 уравнений. Обозначим $\mu = e-v+1$. Ниже мы покажем, что можно записать ни больше, ни меньше, а только μ линейно-независимых уравнений, соответствующих второму закону Кирхгофа. Число μ называется *цикломатическим числом* графа сети

$$\mu = e-v+1 = 9-5+1 = 5.$$

На схеме сети (рис.3) выделим пять контуров (обозначены римскими цифрами – рис.6) и будем осуществлять обход контуров по часовой стрелке.

Тогда

для I

$$h_6 + h_1 + h_8 = 0\,; \tag{23}$$

для II

$$-h_1 + h_2 - h_3 = 0\,; \tag{24}$$

для III

$$h_3 + h_5 - h_4 = 0\,; \tag{25}$$

для IV

$$h_4 + h_7 - h_8 = 0\,; \tag{26}$$

для V

$$-h_5 + h_9 - h_7 = 0\,. \tag{27}$$

Четырнадцать уравнений (14)-(27) образуют математическую модель газораспределительной сети (рис.3, 6). Они содержат 23 переменные, задав девять из которых (по условию задачи), получим разрешимую систему уравнений, решая которую, можно получать ответы на вопросы типа: что будет, если на потребителе номер i. Q_i расход увеличится до величины Q_i', или что будет, если диаметр участка d_i заменить на d_i' и т.д.

Из четырнадцати уравнений системы (14)-(27) только пять (14)-(18) являются нелинейными, а остальные – линейными. Решение задачи значительно упрощается, если упростить исходную модель (14)-(27). А так как существует два способа выражения функциональной зависимости h_i и q_i (14)-(18), то существует также два метода решения этой модели. Рассмотрим метод, аналогичный методу контурных токов для электрических цепей.

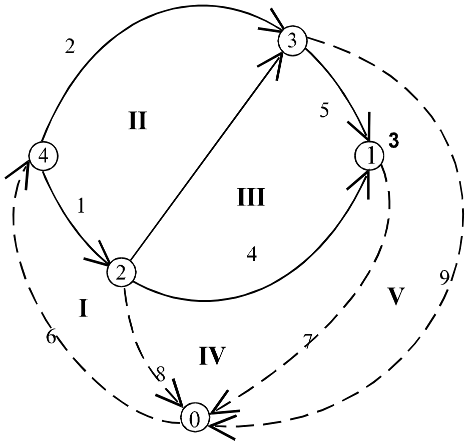

Рис.6

В уравнениях (23)-(27) переменные h_1 - h_5 в соответствии с (14)-(18) выражаем через q_1 - q_5

$$h_6 + f(q_1) + h_8 = 0\ ; \tag{28}$$

$$- f(q_1) + f(q_2) - f(q_3) = 0\ ; \tag{29}$$

$$f(q_3) + f(q_5) - f(q_4) = 0\ ; \tag{30}$$

$$f(q_4) + h_7 - h_8 = 0\ ; \tag{31}$$

$$- f(q_5) + h_9 - h_7 = 0\ . \tag{32}$$

Вернемся к уравнениям (19)-(22). Уравнений ν - 1 = 4, а переменных e = 9. Разбиваем переменные q_1 - q_9 на две группы. Первая группа будет содержать (ν-1) переменную в соответствии с количеством уравнений. Во вторую группу войдут оставшиеся e–ν+1 уравнения (напомним, что мы обозначили e–ν+1 = μ). При этом нужно следить за тем, чтобы ни одна из комбинаций участков, соответствующих переменным первой группы не образовывала замкнутый контур. Тогда переменные первой группы при помощи уравнений (19)- (22) можно выразить через переменные второй группы. Конечная система уравнений еще более упростится, если во вторую группу включим также значения q_i, которые заданы по условию задачи (q_7, q_8, q_9) и не будем включать значения q_i, соответствующие участкам, в которых заданы h_i (это q_6). Остальные переменные (нетрудно заметить, что это расходы на реальных участках q_1 - q_5) разделяются на группы действительно произвольно. Например,

I (q_6, q_1, q_2, q_4); II (q_3, q_5, q_7, q_8, q_9).

Получаем:

из (21, 20)

$$q_1 = q_3 + q_4 + q_8 = q_3 - q_5 + q_7 + q_8; \quad (33)$$

из (22)

$$q_2 = -q_3 + q_5 + q_9 ; \quad (34)$$

из (20)

$$q_4 = -q_5 + q_7 ; \quad (35)$$

из (19)

$$q_6 = q_7 + q_8 + q_9. \quad (36)$$

Подставляем (33)-(36) в (28)-(32):

$$h_6 + f(q_3 - q_5 + q_7 + q_8) + h_8 = 0 ; \quad (37)$$

$$- f(q_3 - q_5 + q_7 + q_8) + f(-q_3 + q_5 + q_9) - f(q_3) = 0 ; \quad (38)$$

$$f(q_3) + f(q_5) - f(-q_5 + q_7) = 0 ; \quad (39)$$

$$f(-q_5 + q_7) + h_7 - h_8 = 0 ; \quad (40)$$

$$- f(q_5) + h_9 - h_7 = 0 . \quad (41)$$

Так как переменные h_6, q_7, q_8, q_9 заданы по условию задачи (т.е. они превращаются в константы), то система (37)-(41) из пяти уравнений ($\mu = 5$) и пяти неизвестных переменных (q_3, q_5, h_7, h_8, h_9) разрешима. Более того, в ней можно выделить уравнения, в которых среди неизвестных нет h_i – (38), (39). Эти уравнения соответствуют контурам II и III (рис.6), они не содержат фиктивных участков. Перепишем их еще раз:

$$- f(q_3 - q_5 + q_7 + q_8) + f(-q_3 + q_5 + q_9) - f(q_3) = 0 ; \quad (42)$$

$$f(q_3) + f(q_5) - f(-q_5 + q_7) = 0 . \quad (43)$$

Получили два уравнения с двумя неизвестными q_3 и q_5.

Таким образом, исходная система уравнений (14)-(27), состоящая из 14 уравнений, продуманной последовательностью подстановок упростилась до системы из двух уравнений. Она является нелинейной и решается одним из ньютоновских методов.

Получив значения неизвестных q_3 и q_5, остальные 12 переменных вычисляем исключительно подстановкой уже вычисленных значений в сформированные ранее уравнения:

подставив q_3 и q_5 в (33)-(36), получаем q_1, q_2, q_4 ,q_6;

подставив q_1, q_2, q_3, q_4, q_5 в (14)-(18), получаем h_1, h_2, h_3, h_4, h_5 ;

подставив q_3 и q_7 в (37), (40), (41) или, что то же самое, подставив h_1, h_4, h_5 в (23)-(27), получаем h_7, h_8, h_9 .

На основе проведенных исследований разработаны алгоритмы, реализованные в виде программных продуктов, которые успешно применялись при выполнении проверочных и других расчетов сетей газо- и водоснабжения различных городов.

1.Евдокимов А.Г. и др. Рациональная эксплуатация и развитие систем водоснабжения и водоотведения. – Харьков, ХТУРЭ, 2002. – 264 с.

2.Евдокимов А.Г., Гринчак Н.В., Жалилов У. Особенности расчета инженерных сетей в интерактивном режиме // АСУ и приборы автоматики. Вып.90. – Харьков: ХИРЭ, 1999. – С.64-69.

3.Оре О. Теория графов. – М.: Наука, 1980. – 336 с.

Получено 15.06.2009

УДК 697.34 : 658.18

Ю.Н.ХАРИТОНОВ, канд. техн. наук
Национальный университет кораблестроения им. Адмирала Макарова, г.Николаев

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТАМИ РЕКОНСТРУКЦИИ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ: КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОЕКТОВ

На основе предложенных классификационных признаков выполнена классификация проектов реконструкции систем теплоснабжения.

На основі запропонованих класифікаційних ознак виконана класифікація проектів реконструкції систем теплопостачання.

The classification of projects of heating supply systems reconstruction has been carried out on the basis of proposed classification features.

Ключевые слова: системы теплоснабжения, управление проектами реконструкции, классификация проектов.

В настоящее время одной из актуальных научно-прикладных проблем энергетики остается проблема реконструкции систем теплоснабжения (СТ) муниципальных образований и крупных промышленных комплексов. Это объясняется рядом причин, среди которых, прежде всего, стоит выделить следующие: высокую степень физического и морального износа элементов систем теплоснабжения, дефицит ресурсов для проведения полномасштабной реконструкции, отсутствие научно-обоснованных рекомендаций по организации и управлению проектами реконструкции СТ [1, 2] и др.

Анализ публикаций, посвященных проблеме организации и управления проектами реконструкции систем энергоснабжения, в том